

纵向岭谷区植被特征参数的空间变异

戴尔阜^① 吴绍洪^② 李双成^③ 王随继^① 周长海^{①④} 郝成元^{①④}

(^① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^② 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; ^③ 北京大学环境学院, 北京 100871; ^④ 中国科学院研究生院, 北京 100049. E-mail: daief@igsnrr.ac.cn)

摘要 采用 GPP(总初级生产力)、NPP(净初级生产力)、NDVI(归一化植被指数)、EVI(增强型植被指数)四项表征植被特征的参数, 对中国西南纵向岭谷区植被特征参数的空间变异性进行分析。采用 Moran 系数(MC)对植被特征参数的空间自相关程度进行度量, 采用半变异函数进行西南纵向岭谷区植被特征参数的空间分异及其结构特征研究。研究结果表明: (1) 植被特征参数在全局范围内呈现负的空间自相关, 各向异性自相关程度均表现在南—北方向自相关程度较大, 其次为东南—西北方向; (2) 植被特征参数的空间变异尺度较大; (3) 植被特征参数在南—北方向上空间自相关距离较大, 其次为东北—西南方向。西南纵向岭谷区植被特征参数的空间分异特征与本区地形走向吻合, 表现出南—北方向的自相关程度较大, 东西方向自相关程度最小。

关键词 植被特征参数 空间自相关 空间变异尺度 空间变异各向异性 纵向岭谷区

世界范围内土地利用-覆被的变化引起全球气候系统的变化, 并对自然资源利用产生重要影响, 产生土壤退化、水质恶化、生物多样性减少等诸多环境问题^[1,2]。对土地覆被格局的认识及其格局对全球环境的影响成为研究热点。植被格局的尺度变化及其效应已得到诸多学者普遍认同^[3-5]。空间精确的多尺度研究方法对生态系统结构、功能及其演化过程的认识至为重要, 诸多方法已被用于生态系统空间格局的模拟和研究^[6-9]。尽管许多模拟方法在精确“再现”生态系统格局方面尚存在缺陷, 但能提供特定条件下生态系统演化的重要信息^[10]。统计学方法是研究生态系统空间数据(诸如 polygons 和 grid 数据)的有效方法之一, 采用经典统计学方法研究生态系统格局已有诸多成果^[10]。采用这种方法的前提是假设数据在统计和分布上是独立的^[11]。

生态系统表现为空间自相关的特征, 即生态系统空间格局的表征指标随尺度变化而呈现相似或相异的规律性。空间依赖性研究虽然在方法较难实现, 但对生态系统格局、过程及其演化提供了重要信息^[12]。空间相互作用(spatial interaction)已镶嵌在众多生态系统格局模拟中^[13]。在地学领域, 地统计学数据主要来源于研究对象在空间区域上的抽样, 进而分析各种自然现象的空间变异规律和空间格局, 并已被证明是研究空间分异和空间格局的有效方法^[14]。本文采用地统计学研究方法, 对中国西南纵向岭谷区植被特征参数空间变异性进行研究, 采用不同植被

特征参数, 对研究区生态格局的空间自相关程度、空间变异尺度、空间变异的各向异性进行分析。

1 研究区域、研究数据及研究方法

1.1 研究区域

纵向岭谷区(Longitudinal range-gorge region, LRGR)位于中国西南, 包括与青藏高原隆升直接相关的横断山区及毗邻的南北走向的山系河谷区(图 1),

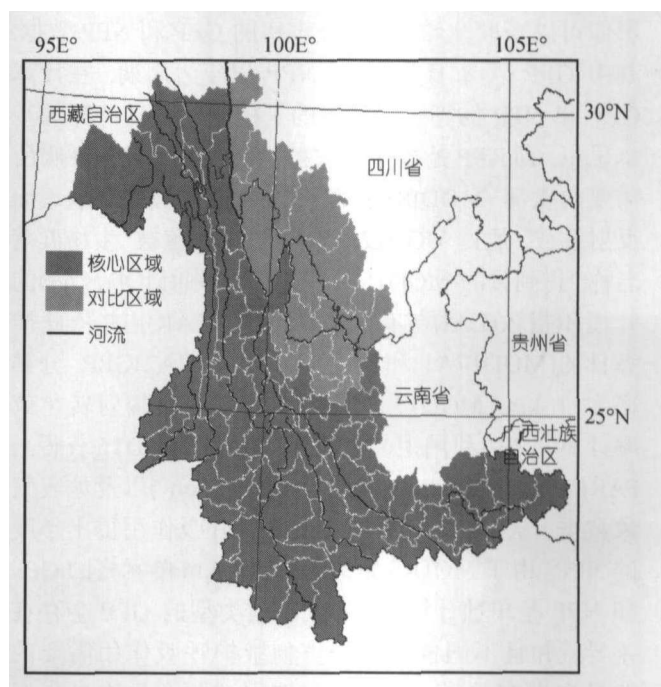


图 1 西南纵向岭谷区

是元江-红河、澜沧江-湄公河、怒江-萨尔温江和伊洛瓦底江4条国际大河的上游,也是中国西南与东南亚极为重要的生态廊道。因大气环流、青藏高原对季风的阻挡、人为作用等因素的影响,纵向岭谷区生态系统格局复杂^[15]。自然地理要素的“通道-阻隔”作用构成各种生物纵向迁徙的走廊和横向交汇的屏障,对生态系统和物种多样性的形成演化有重要影响:生态系统类型和生物类群在局部范围产生了巨大的形态和空间分异,呈现出种类丰富多样、珍稀濒危物种多、新老特有兼备、替代现象明显的特点,是全球重要的生物分布和分化中心。在自然演变和人类活动双重交互作用下,导致了本区生态系统和物种多样性的急剧变化。该区生态系统呈现植被三维地带性分布规律、干旱河谷发育和生态类型复杂多样等特征^[16]。

1.2 研究数据

美国 NASA 全球对地观测系统(EOS)发射的 MODIS 影像,具有新一代“图谱合一”的光学遥感器和高光谱、高时间分辨率特征,第一次实现了近实时、以8天为周期监测植被特征。本文采用 MODIS 影像数据的4个植被参数进行植被特征的空间异质性分析,包括 GPP(总初级生产力)、NPP(净初级生产力)、NDVI(归一化植被指数)、EVI(增强型植被指数)。

GPP 和 NPP 反映的是植物生长量,采用 MODIS 影像可以获取全球 1 km 分辨率的 GPP 和 NPP 数据,其中 GPP 以 8 日为周期, NPP 以年为周期。在计算 GPP 和 NPP 的算法中采用的是植物生长量计算的基本思想,即 NPP 是 GPP 减去植物叶和根系维持呼吸所需要的能量。MODIS 主要通过 MOD09 波段获取表面反射系数,通过 MOD12 波段获取地表覆被、生物群落名称,得到日的(MOD15A1)和 8 天总和(MOD15A2)的叶面积指数(LAI)与有效光合辐射(FPAR),并依此推算日的(MOD17A1)和 8 天总和(MOD17A2)GPP,分辨率为 1 km。MOD17 算法的核心是利用辐射转化效率计算 GPP,利用卫星观测 FPAR(从 MOD15 获得)、PAR(Photosynthetically active radiation)以及地表气象数据,从 GPP 减去植被的维护呼吸作用得出年度的 NPP。由于 MODIS 影像对每个 1 km 单元格的 GPP 和 NPP 是单独计算的,不同植被类型的 GPP 会存在差异,并且不同植被类型植物维护呼吸作用需要的能量也存在差异,因此本文选用这两个生物量指标进行分析。

植被指数通过采用植物反射波段的组合反映植被类型、生物物理和结构特征,及它们的时空变化。MODIS 提供的植被指数产品在 NOAA/AVHRR 的基础上进行了改进,包括气象条件、视角和太阳高度角、云层等的影响,以增强对植被的敏感性,提高了植被指数的监测能力^[17]。MODIS 数据生成两种全球陆地植被指数:NDVI 和 EVI。NDVI 的计算方法和 NOAA/AVHRR 卫星相同,MODIS 提供的 NDVI 植被指数可以看作是 NOAA/AVHRR 的 NDVI 数据序列的延续。基于 MODIS 的增强型植被指数(EVI)通过订正地表反射率以提高对高生物量区的敏感性,通过叶冠背景信号的耦合和减少大气影响来提高植被监测精度,对植被冠层变化非常敏感^[18]。EVI 植被指数降低了对植被冠层背景、大气影响和饱和问题等 NDVI 指数计算中的问题^[19]。MODIS 数据的 NDVI 植被指数连续性很好,而 EVI 植被指数在范围较大的区域内与生物量的变化更为密切,并且对大气影响和植被冠层影响较 NDVI 指数小。因此,在大尺度研究中这两个指数互为补充,在植被生物物理特征指标的量化上更为先进^[20]。

本文采用 2001 年上述四项植被参数进行空间异质性分析,在 GIS 软件中将这些数据转换为空间分辨率为 1 km 的网格,为使空间自相关分析在距离上误差最小,投影方式选择 UTM。

1.3 研究方法

(1) 空间自相关的度量。空间自相关广义反映的是景观特征与临近单元属性值的相关程度^[11,21,22],在本文中表示的是某空间单元植被参数与临近单元植被参数的相关程度。Moran 系数(MC)是用于度量空间自相关的指标之一,反映空间邻接或空间临近的区域单元植被参数的相似程度。空间权重矩阵 W 确定了位置相似性,不同空间单元植被参数特征值 $(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})$ 反映属性相似性,确定了位置临近关系 w_{ij} 和属性相似性 c_{ij} 就可以计算全局 Moran 系数^[23]。

$$I_i = (Z_i / S^2) \sum_{i \neq j}^n w_{ij} Z_j, \quad (1)$$

$$S^2 = \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})^2 / (n-1), \quad (i \neq j) \quad (2)$$

式中, Z_i 和 Z_j 为位置为 i 和 j 的植被参数值与参数均值的偏差,即 $Z_i = x_i - \bar{x}$, $Z_j = x_j - \bar{x}$; w_{ij} 为二元对称空间权重矩阵元素, $w_{ij} Z_j$ 为周围位置植被参数值偏差的加权平均。

Cliff 等^[21]推导了在正态分布条件下 MC 的数学期望 $E[I]$ 和方差 $\text{var}(I)$ 的表达式, 根据这个表达式计算出检验统计量, 可对零假设 H_0 (n 个区域单元的植被参数值之间不存在空间自相关) 进行显著性检验, 即检验所有区域单元的属性值是否存在自相关. $MC=-1/(n-1)$ 时表示一种随机分布模式; 当 $MC>-1/(n-1)$ 且 MC 显著时, 表示植被参数值中相似的属性值倾向于聚集在一起 (正的空间自相关); 当 $MC<-1/(n-1)$ 且 MC 显著时, 表示植被参数值中不同的属性值倾向于聚集在一起 (负的空间自相关)^[24].

(2) 半变异函数. 植被参数的空间分布与地理环境要素密切相关, 在空间上呈现一定的分布规律, 以区域化变量 (regionalized variable) 理论为基础^[25], 研究中国西南纵向岭谷区植被参数的空间分异及其结构特征. 半变异函数计算公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2, \quad (3)$$

其中, $r(h)$ 为样本距为 h 的半方差, h 为样本距 (变程 lag), $N(h)$ 为间距为 h 的样本对的总个数, $Z(x)$ 为位置为 x 处的植被参数值, $Z(x+h)$ 为距离 $x+h$ 处的植被参数值. 当点对间的距离达到一定程度后 (变程 a), 植被参数值的空间自相关消失, 其差异趋于稳定, 不再随距离 h 而变化 (图 2). 变异函数随距离增长的范围为自相关的范围, 是由各种尺度上植被参数的分形结构自相似性所决定^[26]. 因此, 这种尺度是分形存在的尺度. 如果 h 只在一个方向取值, 则可以进行在此方向上的变异分析.

由样本计算出变异函数的实测值后, 可用多种理论模型拟合, 得到模型中 4 个极为重要的参数值: 变程 (lag) a 、基台值 ($sill$) C_0+C 、块金值 ($nugget$) C_0 和分维数 D . 其中块金值代表由非空间采样间距所造成的变异; 变程反映植被参数的空间变异特性, 在变程值以外, 植被参数值存在空间独立性, 而在变程值以内, 植被参数值是空间非独立的; 基台值是在不同空间采样中存在的半方差极大值; 分维数 D 的大小可以作为随机变异的度量^[27], 其计算公式如下:

$$D = 2 - m/2, \quad (4)$$

式中 m 为双对数变异曲线的斜率.

2 结果与分析

2.1 参数统计特征分析

采用经典统计方法, 对植被参数特征值的峰度、偏度和变异系数进行计算 (表 1), 研究区有效数据为 383022 个像元. 通过表 1 可以看出, 不同植被参数具有不同的统计学特征, GPP 数据为正偏低峰, GPP 数据的分布在偏度上较正态分布数据右偏, 峰度上较正态分布数据陡峭, 且数值间变异大; NPP 正偏高峡峰, NPP 数据的分布在偏度上较正态分布数据右偏较大, 峰度上较正态分布数据分布更为陡峭, 数值间变异大; NDVI 和 EVI 具有相似的特征, 负偏低阔峰, NDVI 和 EVI 数据较正态分布左偏, 在峰度上较正态分布数据分布更加平坦, 且变异程度小. 这些统计特征值从整体上对植被参数特征进行了描述.

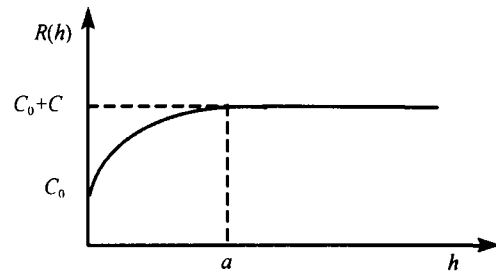


图 2 理论空间变异曲线

通过对 Moran 系数的计算可以看出 (表 1), 不仅不同指标的空间自相关程度不同, 且同一指标在不同方向的空间自相关程度也存在很大差异. 其中, 植被参数在全局范围内呈现总体的负空间自相关, 且 NPP 空间负相关程度较大, 其他参数空间相关程度较小. 各指标的各向异性自相关程度均表现在南北方向自相关程度很大, 其次为西北-东南方向. 这说明纵向岭谷区植被参数在整个区域内因极为破碎的地形分割, 整体空间自相关程度不高; 但在南北走向上纵向岭谷方向植被参数空间自相关程度很高, 与研究区地形走向吻合.

表 1 植被参数统计特征值

指 标	偏态数	峰态数	变异系数	ISO (全局)	MC			
					0°	45°	90°	135°
GPP	0.79	-0.24	0.5189	-0.0996	-0.8834	-0.0299	-0.0998	-0.1324
NPP	1.65	6.32	0.5702	-0.2606	-0.8599	-0.5188	-0.2599	-0.1308
NDVI	-1.11	1.81	0.2470	-0.0253	-0.5911	-0.0034	-0.0305	-0.0634
EVI	-0.85	2.33	0.2234	-0.0017	-0.8475	-0.0201	-0.0033	-0.0958

2.2 植被参数的空间变异特征分析

(1) 各向同性的半方差分析. 采用 GS+软件 7.0 版本对植被参数进行空间变异特征分析, 结果见表 2 和图 3.

根据表 2 及图 3 可以看出, 纵向岭谷区植被参数的空间变异尺度都较大, NDVI 空间变异尺度小于 100 km, EVI 空间变异尺度为 138 km, GPP 和 NPP 空间变异尺度为 230 km 左右. 块金值(C_0)/基台值($sill$)表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的比, 如果该值较高, 说明随机部分引起的空间变异起主要作用. 纵向岭谷区植被参数中, 除 EVI 的 $C_0/sill$ 为 0.5 以外, 其余指标的 $C_0/sill$ 均很低, 这说明结构性因素引起的空间变异起主要作用. GPP 因随机成分引起的空间变异占 23.3%, 结构性变异达到 76.7%; NPP 的空间变异因随机成分引起的占 25.5%, 结构性变异达到 74.5%; NDVI 的空间变异因随机成分引起的占 39.4%, 结构性变异达到 60.6%.

(2) 植被参数的分维分析. 对植被参数进行分维计算, 结果见图 4. 可以看出, 四项参数的分维数在 1.751~1.985 之间, 其中 EVI 的分维数最大(1.985), 说明随机性因素引起的空间变异程度高, 空间分布复杂; 其次为 NDVI(1.990), GPP 和 NPP 的分维数较低. 分维数和上述 $C_0/sill$ 从不同侧面说明了植被参数的空间分布特征. 分维数与块金值、基台值有一定的关系^[28]. 在 EVI 和 NDVI 参数的各向同性半变异分析中, 块金值占基台值的比重较高, 分维数较大, 随机性部分引起的空间变异较大, 空间分布复杂; 而 GPP 和 NPP 参数的各向同性半变异模拟函数中块金值占基台值的比重较低, 分维数较小, 随机性部分引起的空间变异较小, 空间分布的自相关明显.

(3) 植被参数不同方向空间变异特征分析. 为了进一步研究植被参数在不同方向的空间变异特征, 分别计算了各指标沿南—北、东—西、东北—西南和西北—东南方向的半变异函数(图 3). 可以看出, 植被参数具有不同的各向异性特征. GPP 和 NPP 各向异性特征非常相似, 在南—北方向上空间自相关距离较大, 其次为东北—西南方向, 而在东—西方向和西

北—东南方向上空间自相关距离较小, 由此可以看出, GPP 和 NPP 空间分布特征与研究区地形分布特征十分吻合, 在岭谷交错的地带, GPP 和 NPP 表现为南北方向上空间自相关程度大, 而在东西方向上空间自相关程度较小. NDVI 和 EVI 的各向异性也表现出同 GPP 和 NPP 相似的空间各向异性特征, 并且在东—西方向和西北—东南方向空间自相关距离较南—北方向和东北—西南方向更小.

3 结论与讨论

本文以 MODIS 影像获取的植被参数为数据来源, 采用地统计学方法, 进行纵向岭谷区植被参数的空间变异性分析. 通过上述研究, 得出以下基本结论: (1) 研究区植被参数在全局范围内呈现负的空间自相关. 各参数的各向异性自相关程度均表现在南—北方向自相关程度较大, 其次为东南—西北方向; (2) 研究区植被参数的空间变异尺度都较大; (3) 研究区植被参数具有不同的各向异性特征, 在南—北方向上空间自相关距离较大, 其次为东北—西南方向.

纵向岭谷区植被参数的各向异性统计特征、空间变异尺度、空间变异各向异性等空间变异特征与研究区自然地理特征相吻合, 植被参数的空间变异特征在整个区域内因极为破碎的地形分割, 整体空间自相关程度不高; 但在南北走向的纵向岭谷方向植被特征指标空间自相关程度很高, 说明大的地形特征对植被及环境要素的制约, 及在环境要素作用下植被参数的地域分异规律.

虽然上述四项植被参数从植被生长量和植被指数两个方面反映植被特征, 但这些参数间存在相互关系, 如 Zhao 等^[29]给出了 MODIS 数据中 GPP 和 NPP 之间的关系; 已有很多研究证明了 NDVI 和生长季 NPP/ANPP(地上 NPP)存在经验性的回归关系^[30-32], 但这种关系年际之间变化很大^[33-35], 很可能与气候要素和管理要素的年际变化有关^[31]. 本文只是分析了这四项指标的空间变异特征, 并未深入分析这些参数间的相互关系, 如在分析这些参数相互关系的基础上进一步分析参数的空间变异特征更能揭示植被特征空间分布的基本规律.

表 2 植被参数的空间变异特征值

指标	C_0	c	a	$sill$	$C_0/sill$	R^2 (决定系数)	RSS(残差平方和)	拟合模型
GPP	7260000	23890000	234	31150000	0.233	0.650	4.29E+14	球状模型
NPP	4580000	17350000	230.3625	21930000	0.255	0.745	1.93E+14	高斯模型
NDVI	744000	1145000	94.20	1889000	0.394	0.101	3.94E+12	指数模型
EVI	224300	224400	138.600	448700	0.5	0.138	2.62E+11	球状模型

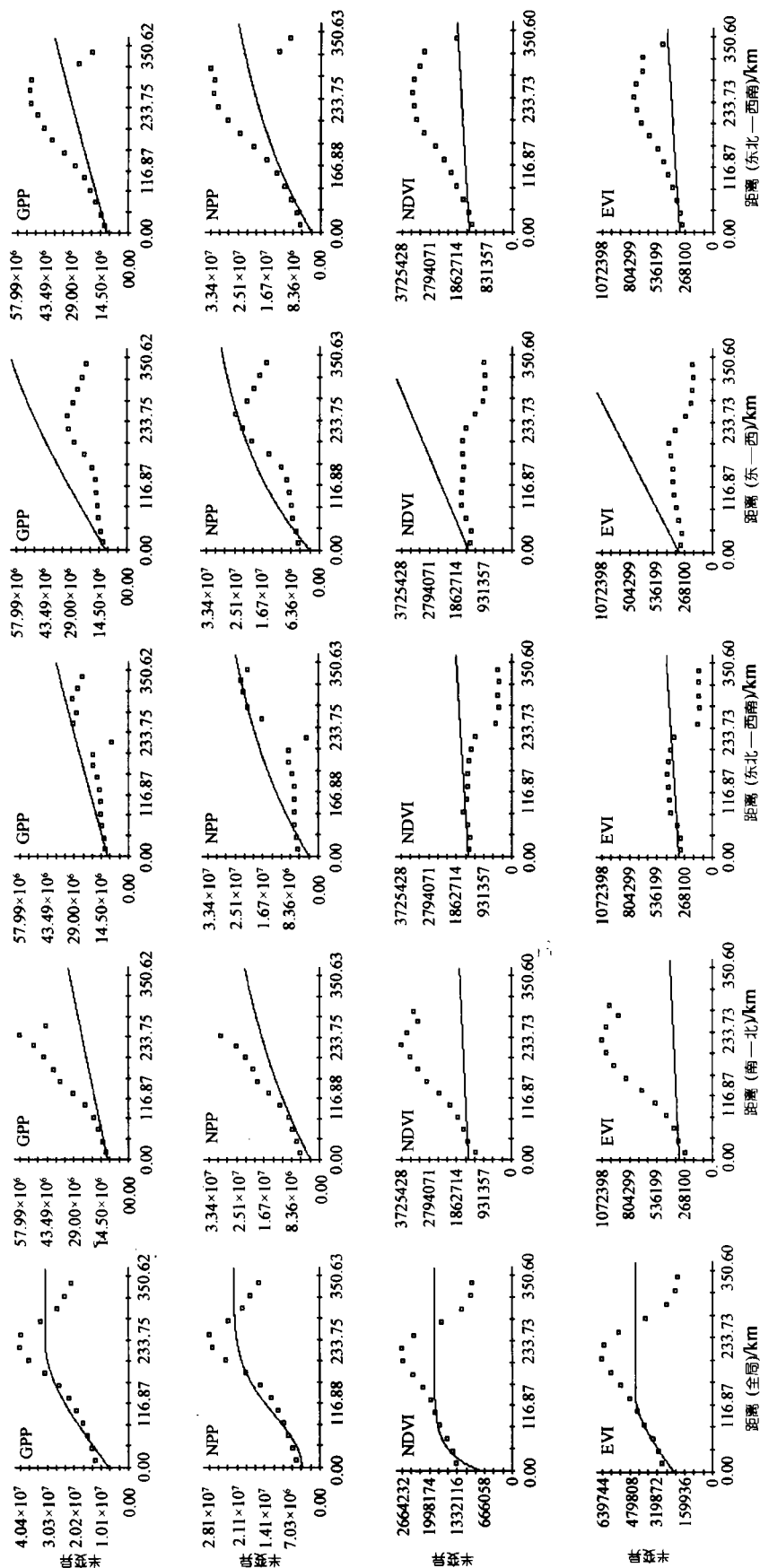


图 3 植被特征各向同性和各向异性半变异

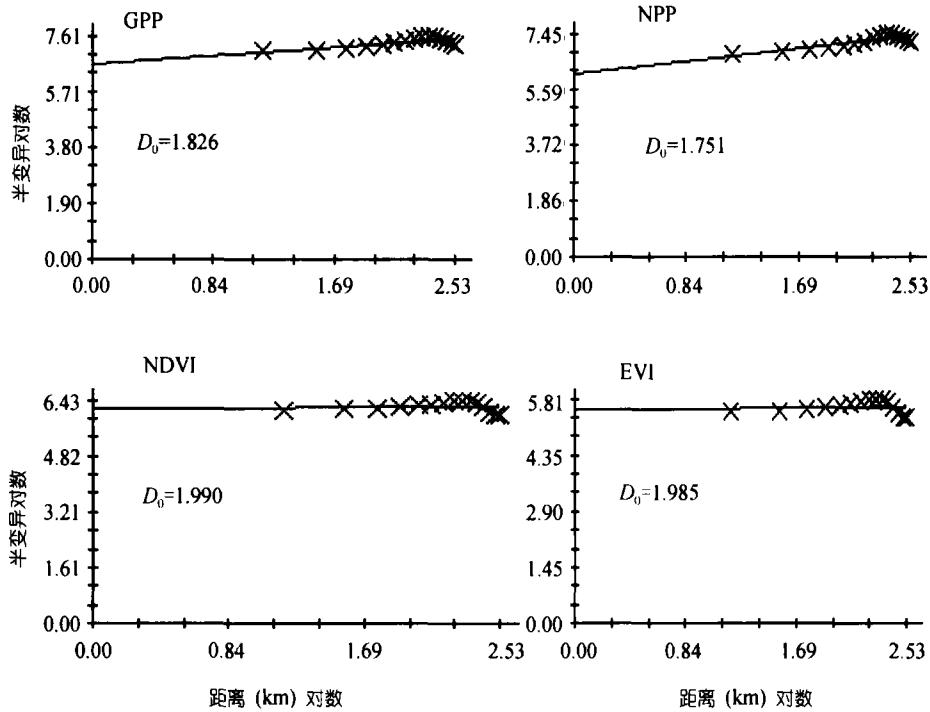


图 4 植被特征的分维数

幅度和精度是生态尺度问题研究的重点,幅度是指时空维度的大小,精度是指度量指标的精确程度^[36]。幅度和精度的综合影响生态过程,而对幅度和精度的选择决定生态系统格局的选择,即生态过程、格局与功能的尺度缩小与放大功能^[37~39]。尺度的变化可能引起结构的变化^[40]。本文中采用空间分辨率为 1 km 的网格数据进行分析,因此所得出的植被参数的空间变异性分析是在这种空间尺度上的表现特征,如能获取更为细致的植被参数,将能够分析在更小分辨率下植被特征的空间分异规律。结合研究区现代地表过程研究^[41]、水文水资源研究等内容^[42~43],综合分析自然环境背景与植被特征的时空耦合关系。

致谢 本工作为国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2003CB415105)资助。

参 考 文 献

- 1 Turner II B L, Meyer W B, Skole D L. Global land use/land cover change: towards an integrated program of study. *Ambio*, 1994, 23(1): 91—95
- 2 Ojima D D, Galvin K A, Turner II B L. The global impact of land-use change. *BioScience*, 1994, 44(5): 300—304
- 3 de Koning G H J, Verborg P H, Veldkamp A, et al. Land use in Ecuador: a statistical analysis at different aggregation levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, 70: 231—247
- 4 Walsh S J, Moody A, Allen T R, et al. Scale dependence of NDVI

and its relationship to mountainous terrain. In: Quattrochi D A, Goodchild M F, eds. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 27—55

- 5 Veldkamp A, Fresco L O. Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica (1973 and 1984). *Agricultural System*, 1997, 55: 19—43
- 6 Anselin L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 284
- 7 Sklar F H, Costanza R. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis. In: Turner M G, Gardner R H, eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, Ecological Studies 82. Berlin: Springer, 1991. 239—288
- 8 Lambin E F. *Modelling Deforestation Processes: A Review*. Trees, Tropical Ecosystem Environment Observation by Satellites, Research Report No. 1. European Commission Joint Research Centre/European Space Agency, 1994. 113
- 9 Kaimowitz D, Angelsen A. *Economic Models of Tropical Deforestation: A Review*. Bogor: Center for International Forestry Research(CIFOR), 1998. 139
- 10 Overmars K P, de Koning G H J, Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. *Ecological Modelling*, 2003, 164: 257—270
- 11 Cliff A D, Ord J K. *Spatial Processes: Models and Applications*. London: Pion, 1981. 266
- 12 Gould P R. Is statistics infers the geographical name for a wild goose? *Econ Geograph*, 1970, 46: 439—448
- 13 Anselin L. Under the hood: issues in the specification and interpretation of spatial regression models. *Agricultural Economics*, 2002, 27: 247—267

- 14 李哈滨, 伍业刚. 景观生态学的数量研究方法. 见: 刘建国主编. 当代生态学博论. 北京: 科学技术出版社, 1992. 209—233
- 15 郑度主编. 青藏高原形成环境与发展. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003. 195—233
- 16 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338—344
- 17 Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices over global set of TM images for EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 1997, 59(3): 440—451
- 18 Gao X, Huete A R, Ni W, et al. Optical biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 609—620
- 19 Huete A R, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. Remote Sensing and Environment, 1994, 49: 224—234
- 20 Huete A, Justice C, van Leeuwen W. MODIS vegetation index (mod13), Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3, 1999
- 21 Cliff A D, Ord J K. Spatial Autocorrelation. London: Pion, 1973
- 22 Goodchild M F. Spatial Autocorrelation. Norwich: Geobooks, 1986
- 23 Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by the use of distance statistics. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189—206
- 24 陈斐, 杜道生. 空间统计分析 GIS 在区域经济分析中的应用. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 391—396
- 25 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 26 Bokviken B, Stokke P K, Feder J, et al. The fractal nature of geochemical landscape. Journal of Geochem Expor, 1992, 43: 91—109
- 27 Palmer M W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. Vegetatio, 1988, 75: 91—102
- 28 李晓燕, 张树文, 王宗明, 等. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局. 地理学报, 2004, 159(6): 989—997
- 29 Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvement of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95: 164—176
- 30 Goward S N, Tucker C J, Dye D G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. Vegetatio, 1985, 64: 3—14
- 31 Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. Ecology, 1997, 78: 953—958
- 32 Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, et al. Relationship between atmospheric CO₂ variation and a satellite-derived vegetation index. Nature, 1986, 319: 195—199
- 33 Briggs J M, Nellis M D, Turner C L, et al. A landscape perspective of patterns and processes in Tallgrass Prairie. In: Knapp A K, Briggs J M, eds. Grassland Dynamics: Long-term Ecological Research in Tallgrass Prairie. New York: Oxford University Press, 1998. 265—279
- 34 Diallo O, Diouf A, Hanan N P, et al. AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987—1988. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12: 1259—1279
- 35 Wylie B K, Harrington J A, Prince S D, et al. Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986—1988. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12: 1281—1300
- 36 Verburg P H, Chen Y Q. Multiscale characterization of land-use patterns in China. Ecosystems, 2000, 3: 369—385
- 37 Allen T F H, Hoekstra T W. Role of heterogeneity in scaling of ecological systems under analysis. In: Kolasa J, Pickett S T A, eds. Ecological Heterogeneity. New York: Springer-Verlag, 1991. 47—68
- 38 O'Neill R V, Turner S J, Cullinan V I, et al. Multiple landscape scales: an intersite comparison. Landscape Ecology, 1991, 5(3): 137—144
- 39 Bergkamp G. A hierarchical approach for desertification assessment. Environmental Monitoring Assessment, 1995, 37(1-3): 59—78
- 40 Curran P J, Foody G M, van Gardingen P R. Scaling-up. In: van Gardingen P R, Foody G M, eds. Scaling-up from Cell to Landscape. Society for Experimental Biology Seminar Series 63. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 1—6
- 41 甘淑, 何大明, 冯彦. 纵向岭谷区流域景观及其现代地表过程作用. 科学通报, 2006, 51(增刊): 27—31
- 42 何大明, 冯彦, 甘淑, 等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应. 科学通报, 2006, 51(增刊): 14—20
- 43 冯彦, 何大明, 甘淑, 等. 跨境水分配及其生态阈值与国际法. 科学通报, 2006, 51(增刊): 21—26

(2005-12-16 收稿, 2006-04-30 收修改稿)